

Deze bijdrage beoogt te laten zien hoezeer thans psychologie en neurowetenschap met elkaar ver-
vlochten raken. Alvorens echter de relatie tussen
psychologie en neurowetenschap nader in te vul-

Wetenschap

De koninklijke verloving tussen psychologie en neurowetenschap

Als ik Peter Struyckens punten-
wolk op een postzegel van 39
cent op uw netvlies projecteer,
bent u in staat deze visuele
informatie als een gezicht te
zien, bovendien daarin het
gezicht te herkennen van onze
vorstin, de naam die bij het gezicht hoort uit het geheugen op
te halen, de gevoelens die ze bij u oproept in woorden aan een
ander mee te delen, et cetera.

Waarneming, geheugen, aandacht, taal, het plannen en
uitvoeren van beweging, emotie, bewustzijn, het zijn evenzo-
veel woorden voor uiterst complexe processen die zich bij
voortdurend in onze hersenen afspelen. Het totaal en samen-
spel van al deze processen is wat wij onder geest verstaan.

Via vaak ingemeuze experimenten is in het psychologisch
laboratorium inzicht verkregen in de wijze waarop deze pro-
cessen verlopen. Zo hebben we bijvoorbeeld in de laatste
decennia een steeds nauwkeuriger beeld gekregen van hoe
de luistertaar in de luchttrillingen die een spreker produceert
klanken en woorden herkent en die tot een betekenisvolle
interpretatie samensmeedt. De hele cascade van processen die
daarbij een rol speelt laat zich samenvatten in de cognitieve
architectuur van taalverstaan. Het psychologisch onderzoek
heeft tot vergelijkbare blauwdrukken geleid voor visuele
waarneming, het ophalen van informatie uit het geheugen,
het sturen van aandacht, et cetera.

Het uitgangspunt van de neurowetenschap is dat al deze
complexe mentale processen mogelijk zijn bij de gratie van de
hersenen. De grondgedachte van de neurowetenschap (inclu-
sief de neuropsychologie) is dat de menselijke geest niet in de
vrije ruimte zweeft, maar vast verankerd is in de hersenen. Dit
is kort en bondig samengevat in het materialistisch adagium
van Jacob Moleschott (1822-1893): 'Zonder fosfor geen
gedachten.'

In de context van de neurowetenschap anno nu laat dit
zich vertalen in: zonder onze hersenen geen geheugen, taal,
perceptie, emotie, bewustzijn; en al evenmin geloof, hoop en
liefde. Het zijn de hersenen die in een lang proces van evolu-
tionaire ontwikkeling hun huidige vorm hebben gekregen en
daarmee de mogelijkhedenvoorwaarden voor de verschillen-

len, is het van belang
aan te geven wat
de centrale opdracht
van de psychologie
is. Deze is: uit zoeken
hoe het complexe

Peter Struyckens

samenstel van cognitieve en emotionele vaardig-
heden waarover wij beschikken, is opgebouwd.

Dit zal worden toegelicht aan de hand van een
voorbeeld.

de aspecten van menselijke cog-
nitie realiseren. De neuroweten-
schap onderzoekt onder andere
menselijke cognitie in relatie tot
de evolutionair bepaalde orga-
nisatieprincipes van het brein.
Daarbij wordt gepoogd na te

gaan hoe de componenten van de cognitieve architectuur in
de hersenen zijn verwezenlijkt. De cognitieve architectuur
wordt vastgeknoopt aan de neurale architectuur.

Tot voor kort was de neurowetenschap bij het onderzoe-
ken van de neurale architectuur van mentale functies aange-
wezen op experimenten van de natuur in de vorm van een
hersenenbeschadiging. Op basis van de door de hersenaandoe-
ning veroorzaakte uitvalsverschijnselen kon de rol van het
beschadigde gebied in het intacte brein worden gereconstru-
eerd. Deze werkwijze kent een aantal inherente beperkingen.
Experimenten van de natuur in de vorm van hersenenbescha-
digingen zijn niet herhaalbaar en al evenmin onder experi-
mentele controle te brengen, twee cruciale ingrediënten van
een op natuurwetenschappelijke leest geschoeide psycholo-
gie. Wat de natuur ons aanreikt in de vorm van patiënten met
een hersenaandoening is van geval tot geval verschillend en
laat geen ruimte voor sturing door de onderzoeker. De klas-
sieke neuropsycholoog is een detective die uit de aangele-
verde bewijsstukken aard en omvang van het neurale misdrijf
op het spoor tracht te komen. Liever echter zou hij een experi-
mentator zijn die zelf van het begin af aan bij de pilot betrok-
ken is.

Hoezeer is in het licht van deze beperkingen het onder-
zoek naar de relatie tussen hersenen en cognitie gebaat bij
mogelijkheden het gezonde brein aan het werk te kunnen
zien tijdens bijvoorbeeld het herkennen van het gezicht van
onze vorstin, en tijdens vele andere cognitieve processen. Het
goede nieuws is dat met name in de laatste twee decennia de
technologische mogelijkheden daartoe zich in een snel tempo
hebben ontwikkeld. Voor het eerst in de geschiedenis van de
psychologie is het daarmee mogelijk geworden de veranke-
ring van de geest in de menselijke hersenen op een experi-
menteel gecontroleerde en herhaalbare wijze te onderzoeken.

De nieuwe uitdaging

Wij staan thans aan het begin van een nieuwe eeuw waarin de mogelijkheden om bij de mens de werking van het levende brein te meten en zichtbaar te maken groter zijn dan ooit tevoren en richtinggevend zullen blijken voor de verdere ontwikkeling van de psychologie. Theorieën over de neurale basis van menselijke cognitie en voortschrijdende mogelijkheden om het intacte levende brein te onderzoeken, zullen in toenemende mate worden betrokken bij het beantwoorden van klassieke vragen in de psychologie. Nu reeds zijn de contouren zichtbaar van een vakgebied waarin experimenteel psychologen, cognitieve neuropsychologen, neurologen, neurobiologen, biofysici, en mathematisch geschoolde onderzoekers eendrachtig werken aan de beantwoording van onderzoeksvragen op het terrein van perceptie, geheugen, taal, aandacht, et cetera.

Dit interdisciplinaire vakgebied is tijdens een taxirit in New York door George Miller en Mike Gazzaniga cognitieve neurowetenschap gedoopt. Alvorens de contouren daarvan te schetsen, wil ik een tweetal voorbeelden geven van cognitieve neurowetenschap anno nu. Als ik het daarbij in het vervolg over cognitie heb, dan is dat bedoeld in de brede zin van het woord, dat wil zeggen inclusief sensorische en motorische processen, en eveneens inclusief emotie.

Cognitieve neurowetenschap in beeld

Visuele waarneming

Stelt u zich als lezer het beeld voor van Marco Pantani op de flanken van de Alpe d'Huez. Wat u waarneemt herkent u als de kleine wielrenner met de grote oren die zich op een veelkleurige racefiets bergopwaarts beweegt. Het nodige is inmiddels bekend over wat zich tijdens dit waarnemingsproces in de hersenen afspeelt.

De visuele informatie wordt vanaf het netvlies via het corpus geniculatum laterale doorgeschakeld naar de visuele schors achter in het hoofd. Vandaar wordt de visuele informatie langs parallelle routes verder verwerkt. De zogenaamde ventrale route stelt ons in staat de identiteit van vormen en objecten vast te stellen. De dorsale route codeert voor beweging en de ruimtelijke oriëntatie van het waargenomen. Daarbij valt Marco Pantani tijdens het waarnemingsproces in eerste instantie uitte in kleur, vorm en beweging die op nog niet geheel begrepen wijze worden samengevoegd tot een geïntegreerd percept.

Er zijn dus in het visuele systeem van onze hersenen verschillende gebieden met een zekere functionele specialisatie. Het gebied dat aangeduid wordt als v_4 is cruciaal voor de waarneming van kleur, het meer dorsaal gelegen $MT (v_5)$ is van belang voor de waarneming van beweging.

In de neuropsychologie is reeds lang bekend dat een hersenbeschadiging selectief aspecten van de waarneming kan uitschakelen. Zo zijn er patiënten die geen kleur meer kunnen waarnemen en de wereld alleen in grijstinten zien, een verschijnsel dat als cerebrale achromatopsie bekend staat.

Andere patiënten nemen geen beweging meer waar. Voor dergelijke patiënten is de wereld een serie 'snapshots', met alle bijkomende problemen van dien. Neem bijvoorbeeld de 43-jarige vrouw die aan akinetopsie lijdt ten gevolge van een hersenbeschadiging in de temporopariëtale gebieden van beide hersenhelften (Zihl, Cramon, & Mai, 1983; zie ook Zeki, 1991). Als gevolg van haar onvermogen beweging te zien, heeft zij grote moeite met het oversteken van de straat. Hoewel ze de auto's zonder problemen kan identificeren, is ze niet in staat de verplaatsing en snelheid van de auto's adequaat waar te nemen. Het ene moment is de auto ver weg, het volgende moment is hij dichtbij, zonder dat zij verplaatsing van de auto heeft waargenomen. Bij het inschenken van thee of koffie lijkt de vloeistof bevroren als een gletsjer, en weet ze niet wanneer ze moet stoppen met inschenken, omdat ze het niveau in het kopje niet ziet stijgen.

Hoewel uit neuropsychologische gevalbeschrijvingen en uit onderzoek bij apen bekend was dat aspecten van de visuele wereld langs gescheiden wegen in ons brein worden verwerkt, is het pas met de komst van recente hersenscanningstechnieken mogelijk geworden dit hele netwerk van visuele gebieden in het menselijk brein aan nader onderzoek te onderwerpen.

Eén manier om hersenactiviteit zichtbaar te maken is via het meten van de locale doorbloedingspatronen van het brein. Functionele Magnetische-Resonantie-Imaging (fMRI) en Positron-Emissie-Tomografie (PET) zijn de meest geavanceerde technieken om dat te doen. De achterliggende gedachte bij het gebruik van deze technieken is dat het lokale doorbloedingspatroon in het brein gerelateerd is aan hersenactiviteit. Dit idee werd in 1890 voor het eerst gelanceerd door de Engelse fysiologen Roy en Sherrington. Roy en Sherrington veronderstelden dat de bloedtoevoer naar een bepaald hersengebied toeneemt bij verhoogde activiteit.

De MRI-scanner berust op de meest recente technieken om de hersenen in beeld te brengen. Een MRI-scanner bestaat uit een grote supergeleidende magneet, een aantal kleinere magneten die aan de binnenkant gemonteerd zijn (de zogenaamde gradiëntspoelen), en een reeks computers en versterkers. Het magneetveld in de buis is zeer sterk (doorgaans 1.5 Tesla). Bij deze veldsterkte zal bijvoorbeeld een sleutelbos die bij de opening van de scannerbuis wordt losgelaten een meter verderop in de buis al een snelheid van 60 kilometer per uur bereikt hebben. Dit magneetveld is ook zo sterk dat de waterstofprotonen in het lichaam erop reageren. Zoals in alle atomen, draaien deze protonen om een eigen as. De richting van die as is doorgaans willekeurig, maar in de magneet legt een deel van de waterstofprotonen zijn as in de richting van de magneet.

Door energie toe te voegen aan de protonen in de vorm van radiogolven van een heel specifieke frequentie (een zogenaamde RF-puls) raakt de rotatie-as even uit het lood. Zodra de RF-puls stopt, keren de protonen naar de uitgangsrichting terug, en wordt de opgenomen energie weer uitgestraald als radiogolven in de gegeven frequentie. Deze straling wordt door een uiterst gevoelige ontvanger opgepikt.

De protonen zijn bijzonder gevoelig voor de specifieke frequentie van de α -puls. Deze frequentie hangt onder andere af van de exacte sterkte van het plaatselijke magneetveld.

De extra magneten binnen in de buis (de gradiëntspoelen) zorgen ervoor dat het magneetveld overal in het lichaam (c.q. brein) verschilt. De frequentie van het radiosignaal dat de protonen oppikken en na de α -puls weer uitsralen, is daardoor afhankelijk van hun plaats in de ruimte. De frequentie van het signaal dat afgegeven wordt is zo naderhand nauwkeurig te herleiden tot de plaats waar de protonen zich bevinden. Behalve plaatsbepaling, kan ook de locale signaalsterkte worden gemeten. De signaalsterkte hangt onder andere af van het type weefsel, en verschilt in het brein voor grijze stof, witte stof en hersenvocht.

Met de MRI-scanner kunnen niet alleen hersenstructuren zichtbaar gemaakt worden, maar is ook hersenactiviteit te meten. In dat geval spreken we van functionele MRI (fMRI). De eerste succesvolle toepassing van fMRI bij de mens dateert van het begin van de jaren negentig.

Bij functionele MRI maken we gebruik van het gedrag van haemoglobine in het magneetveld. Haemoglobine is de transporteur van zuurstof in het bloed en bevat onder andere ijzer. De ijzerkern heeft vrijwel geen effect op het magneetveld als er zuurstof aan het haemoglobine is gebonden. Echter, wanneer de zuurstof is afgestaan verstoort het ijzer het veld zodanig dat het MR-signaal op die plaats zwakker is. De meest gebruikte fMRI-techniek (BOLD) berust op de verandering in de sterkte van het MR-signaal ten gevolge van een verandering in de zuurstofconcentratie in het bloed. De mate van zuurstofverzadiging van het bloed verandert bij toegenomen hersenactiviteit. Het resulterende effect op de sterkte van het MR-signaal stelt ons in staat de plaats te bepalen waar in het brein activiteitstoename heeft plaatsgevonden. Daarbij kan een oplossend vermogen bereikt worden van enkele millimeters. Met behulp van fMRI kan worden zichtbaar gemaakt dat een statisch patroon van punten de primaire visuele schors en aangrenzende cortex activeert (v1 en v2). Op het moment dat de punten gaan bewegen wordt een ander gebied actief, gelegen in de middelste sulcus van de temporaalkwab. Dit gebied (MT, v5) speelt een cruciale rol bij het waarnemen van beweging. Zouden de punten zich groeperen tot het gezicht van Beatix, dan nemen we hersenactiviteit waar in de onderste winding van de temporaalkwab. Dit gebied speelt een belangrijke rol bij het herkennen van gezichten.

Mede dankzij technieken als PET en fMRI ontstaat een steeds gedetailleerder beeld van het netwerk van hersengebieden dat in het humane brein bij visuele waarneming betrokken is. Elk van de gebieden in dit netwerk heeft een zekere specialisatie. De verschillende aspecten van de visuele wereld worden langs verschillende routes door het brein geleid.

In ons bewustzijn zien wij een wielrenner op een veelkleurige racefiets die zich in volle vaart van de berghelling stort. Dit is de uitkomst van een orkestratie van gedistribueerde hersenactiviteit die deze geïntegreerde waarneming construeert uit het samenraapsel van vorm, kleur en beweging.

Taal

De voorbeelden die ik tot nu toe gegeven heb waren alle afkomstig uit het domein van de visuele waarneming. Mijn eigen onderzoeksterrein betreft een andere kernfunctie in het spectrum van menselijke cognitie, en dat is taal. In vergelijking met onze kennis over het visuele systeem, is wat we weten over de neurale organisatie van het menselijk taalvermogen beperkt. Een van de redenen is dat we voor taal niet over een diermodel beschikken. Geen andere soort dan *homo sapiens* heeft in de loop van de evolutionaire geschiedenis een communicatiesysteem ontwikkeld waarin een eindig aantal symbolen en combinatieprincipes een oneindige variatie aan uitingen mogelijk maakt. Als het over het menselijk taalvermogen gaat, schieten we om die reden niet veel op met diermodellen, en zijn we in nog sterkere mate dan voor andere cognitieve functies aangewezen op de recente mogelijkheden het menselijk brein in werking te onderzoeken.

Over de cognitieve architectuur van taalvermogens zoals spreken en luisteren is inmiddels wel het nodige bekend. Zo weten we dat de woorden van het Nederlands uit zo'n 35 verschillende klanken zijn opgebouwd en dat u als spreker van het Nederlands informatie over ten minste 40.000 Nederlandse woorden in het geheugen hebt opgeslagen.

Hoe vanuit die 35 klanken zo'n omvangrijk repertoire aan woorden kan worden opgebouwd laat zich illustreren aan het gedicht *Gedacht* van Gerrit Kouwenaar (*Data, decors*, 1971), waarin op briljante wijze gespeeld wordt met het gegeven dat minimale klankverschillen leiden tot woorden met geheel andere betekenissen.

Gedacht

*Je hand is bijna je hond
je huid is bijna je huis
je vorm is bijna je worm
je gedicht is bijna wat je gedacht had.*

Behalve klankinformatie ligt in het geheugen ook kennis opgeslagen over de betekenis van woorden en over hun syntactische eigenschappen. Zo weten we dat *koe* een zelfstandig naamwoord is. Daarom kunnen we wel zeggen 'de koe loopt', maar niet 'De loop koer'. Bij spreken en luisteren wordt al deze informatie in een fractie van een seconde uit het geheugen opgehaald. De snelheid waarmee wij kunnen spreken en luisteren is ronduit verbazingwekkend.

Zonder problemen volgen wij op een doorsnee zondagavond in de uitzending van *Studio Sport* het commentaar bij de paardenkoers van de maand. De verslaggever laat zich daarn door de paarden regelmatig opjagen tot een spreektempo van zo'n vier woorden per seconde. Om zijn commentaar te begrijpen moeten de kijkers uit hun omvangrijke mentale woordenbestand de juiste woorden inclusief hun syntactische en semantische kenmerken ophalen. De verslaggever zelf moet bij het spreken met dezelfde snelheid de juiste woorden selecteren, maar ook nog eens de grote hoeveelheid spieren aansturen, zo'n honderd in getal, die bij het articuleren van woorden en zinnen betrokken zijn. Ook bij een doorsnee

spreektempo van twee woorden per seconde blijft dit een verbazingwekkende prestatie.

Dankzij het registreren van de elektrische activiteit van de hersenen hebben we een vrij precies beeld gekregen van het tijdsverloop van het spreekproces. Stelt u zich voor dat u bij het betreden van de supermarkt ineens Karol Wojtyła tussen de schappen ontwaart. Een zeer voor de hand liggende reactie is dat u uw medeklanten daarop opmerkzaam maakt door uit te roepen: 'De paus'. Het cognitieve architectuurmodel van Roelofs en Levelt specificiert de ophaalprocessen die zich afspelen tussen het herkennen van Karol Wojtyła en het articuleren van het woord 'paus' (zie Levelt, 1999; Levelt, Roelofs & Meyer, 1999). Op basis van de visuele informatie herkent u Wojtyła, hetgeen aanleiding is tot het activeren van het concept 'paus'. Dit concept bevindt zich in een netwerk van andere concepten die tezamen uw kennis over de paus in het langetermijngeheugen representeren. Op basis van het activeren van dit concept wordt in een eerste stap de syntactische informatie opgehaald. Deze zogeheten lemma-informatie vertelt u onder andere dat 'paus' een zelfstandig naamwoord is en geen werkwoord. Vervolgens worden de daarbij horende klanken uit het geheugen opgediept, het klankpatroon samengesteld en de articulatieorganen aangestuurd.

Op basis van elektrofyysiologische metingen weten we inmiddels dat zo'n 40 milliseconden (dat is 1/25 seconde) na het ophalen van de syntactische informatie, de beginklank van 'paus' uit het geheugen wordt opgehaald. Tevens hebben we gevonden dat het klankpatroon van een woord niet in één keer in zijn geheel wordt opgehaald, maar van links naar rechts. Daarbij duurt het iets minder dan 80 milliseconden om de overige klanken van 'paus' op te halen nadat de p-klank beschikbaar gekomen is (zie verder Hagoort & Van Turenout, 1997; Van Turenout, Hagoort & Brown, 1997, 1998). Op basis van dit soort registraties van hersenactiviteit, waarover verderop nog iets meer, is de temporele dynamiek van de processen die aan spreken ten grondslag liggen nauwkeurig in kaart gebracht.

Tevens maken deze resultaten duidelijk dat woorden niet als kant en klare pakketjes in ons brein liggen opgeslagen. Uit een analyse van een groot aantal PET- en fMRI-studies naar het ophalen van woordinformatie blijkt dat een heel netwerk van hersengebieden in de linker hersenhelft daarbij betrokken is. Al deze gebieden worden op een neuraal georkestreerde wijze in het spreekproces ingeschakeld.

Tot zover heb ik het gehad over het spreken van losse woorden. Doorgaans lezen of spreken we echter geen losse woorden, maar uitingen bestaande uit een hele reeks woorden. Hoe die woorden met elkaar samenhangen wordt onder meer bepaald door de grammaticale kennis die in ons brein ligt opgeslagen.

Een voorbeeld uit de categorie 'man bijt hond'. In talen zoals het Duits bepaalt onder andere de naamvalsmarkering van het lidwoord of een zelfstandig naamwoord onderwerp dan wel lijdend voorwerp van de zin is. 'Der Hund hat den Bundeskanzler gebissen' en 'Den Hund hat der Bundeskanzler gebissen' bevatten beide dezelfde inhoudswoorden (*hond,*

bondskanselier, bijten) en ook nog eens in dezelfde volgorde. Toch is de betekenis van deze zinnen verschillend. In het eerste geval gaat het om de hond die de bondskanselier bijt, in het tweede geval is sprake van het 'man bijt hond'-scenario. Alleen het laatste geval zou zonder enige twijfel de kolommen van *Bild-Zeitung* halen.

Het verschil tussen beide zinnen zit hem in de lidwoorden. Lidwoorden, voegwoorden zoals *want* en *maar*, en voorzetsels zijn elementen die het syntactisch cement vormen tussen de inhoudswoorden van de zin. Taalkundigen maken onderscheid tussen inhoudswoorden en functiewoorden. Inhoudswoorden reiken de cruciale betekenisrediënten van de zin aan, functiewoorden spelen een belangrijke rol bij het aanbrengen van de structurele relaties tussen de inhoudswoorden.

Eén van de vragen die mijn collega's en ik ons stelden, was of wij hersenactiviteit konden registreren die laat zien *dat*, en *op welk moment* onze hersenen onderscheid maken tussen deze twee typen woorden. Dit deden we door het meten van het EEG. Ik verwees eerder naar resultaten die gebaseerd waren op het registreren van de elektrische activiteit van het brein. Alvorens te laten zien hoe we langs deze weg voor taal relevante hersenactiviteit kunnen meten, moet ik iets meer over deze methode vertellen.

Informatieoverdracht in het centrale zenuwstelsel vindt onder andere plaats door middel van elektrische activiteit van de zenuwcellen (neuronen). Hans Berger (1873-1941) publiceerde in 1929 een methode om deze elektrische hersenactiviteit bij mensen te registreren met behulp van op de schedel bevestigde elektrodes. Het resulterende EEG (Elektroencefalogram) heeft sindsdien een belangrijke rol gespeeld in de klinische diagnostiek bij patiënten met hersenaandoeningen.

Het klinische EEG geeft een globaal beeld van de elektrische activiteit van de hersenen onder bepaalde algemene condities van het organisme, zoals slapen of waken. Het is echter ook mogelijk het EEG te registreren in afhankelijkheid van cognitieve processen.

Indien men het EEG registreert bij iemand die naar een bepaalde stimulus luistert of kijkt en dit EEG daarna middelt over een aantal aanbiedingen van de stimulus, dan zien we een identificeerbaar patroon van negatieve en positieve pieken in het EEG-signaal ontstaan. Deze pieken zijn de zogenaamde ERP-componenten, waarbij ERP staat voor Event-Related Potential. Deze ERPs geven onder andere informatie over de aard van bepaalde cognitieve processen, zoals het voorbereiden van een beweging, het registreren van een onverwachte gebeurtenis, et cetera.¹

Tegenwoordig worden ERPs veelal gemeten met behulp van een groot aantal elektrodes die in een bepaalde ruimtelijke configuratie op de hoofdhuid zijn bevestigd. Op basis van dergelijke registraties kan een beeld worden verkregen van de in de tijd en over de schedel fluctuerende patronen van potentiaalveranderingen.

In ons onderzoek registreerden wij het EEG over een groot aantal elektrodes terwijl de deelnemers een simpel verhaaltje

over de wederwaardigheden van een fles te lezen kregen. Het verhaaltje ging als volgt:

Het leven van de fles

Honderd jaar geleden was een fles ook al een gewoon en dagelijks voorwerp. Toch voelde de fles van ons verhaal zich bijzonder, want zij was een wijnfles. Trots keek zij naar de andere produkten van de glasfabriek. Dat waren jampotjes en schalen en glazen. Zij was blij dat zij niet zo was, want wijn is toch heel anders dan jam.

Voor uw gemak is hier een aantal functiewoorden onderstreept, en een aantal inhoudswoorden vet gedrukt. De deelnemers aan het onderzoek zagen echter alle woorden één voor één in witte letters op de monitor verschijnen. Na afloop van de registratie berekenden wij afzonderlijke gemiddelden voor de stukjes EEG die samenhangen met het lezen van inhoudswoorden en voor de stukjes EEG die verband hielden met het lezen van de functiewoorden.

Uit de resultaten blijkt dat het brein al binnen een kwart seconde onderscheid maakt tussen inhoudswoorden en functiewoorden. Voor de functiewoorden is op dat moment een negatieve ERP-component zichtbaar over het linker frontale deel van de schedel, die we niet zien voor de inhoudswoorden (Brown, Hagoort & Ter Keurs, 1999).

Laten we hetzelfde verhaaltje lezen aan afasiepatiënten met een syntactische stoornis (zogenaamde agrammatische patiënten), dan blijkt dat in het brein van deze patiënten het onderscheid tussen inhouds- en functiewoorden niet gemaakt wordt op het tijdstip waarop dit voor een efficiënt taalverwerkingsproces kennelijk nodig is. De topografische kaarten voor beide woordsoorten verschillen bij deze patiënten niet (Ter Keurs, Brown, Hagoort & Stegeman, 1999).

Welke hersengebieden zijn van belang om het syntactisch cement in zinnen aan te brengen? Om dat te achterhalen deden we een PET-studie waarin deelnemers korte filmpjes te zien kregen. In deze filmpjes botsten simpele geometrische figuren tegen elkaar. In een zo'n filmpje bijvoorbeeld stootte het rode vierkant de groene ellips weg. Deelnemers werd in één conditie van het experiment gevraagd deze visuele gebeurtenissen in een volledige, grammaticaal correcte zin te beschrijven (*Das rote Viereck stösst die grüne Ellipse weg*). In een andere conditie beschreven ze dezelfde situaties als een losse reeks van woorden zonder syntactisch cement (*Viereck rot. Ellipse grün. wegstossen*). Omdat we dit onderzoek in Duitsland deden met Duitse deelnemers, werden deze gevraagd de visuele gebeurtenissen in het Duits te beschrijven. De syntactische elementen in de zinsconditie zijn vet gedrukt. Dit zijn onder andere de naamvalsmarkeringen van de lidwoorden, de verbuigingsuitgangen van de adjectieven en de vervoeging van het werkwoord. Deze elementen brengen het syntactisch cement in de zinnen aan.

Als we de hersenactiviteit in die conditie vergelijken met die waarin dezelfde situaties als een reeks van losse woorden

beschreven worden, zien we toename van hersenactiviteit in de frontaalkwab van de linker hersenhelft, in een gebied dat grenst aan het gebied van Broca. Dit gedeelte van de cortex is dus kennelijk van groot belang voor het aanbrengen van syntactische structuur in uitingen die uit meerdere woorden bestaan (Indefrey et al., 2001).

De verlovings tussen psychologie en neurowetenschap

Hierboven heb ik enkele voorbeelden gegeven van onderzoek en onderzoekstechnieken in de cognitieve neurowetenschap. Daarbij is duidelijk geworden dat we vandaag de dag de werking van de hersenen in beeld kunnen brengen op een wijze die tot voor kort ondenkbaar was. Een eis die aan theorieën en verklaringen in de cognitieve neurowetenschap gesteld moet worden, is dat deze de organisatieprincipes van cognitie en de organisatieprincipes van het brein op een transparante manier op elkaar weten te betrekken. Hoe explicieter de organisatieprincipes op beide niveaus zich laten formuleren, des te preciezer zal de relatie tussen brein en cognitie gespecificeerd kunnen worden.

Dit brengt mij bij de verlovings tussen psychologie en neurowetenschap. Zonder expliciete analyse van cognitieve functies is onderzoek naar de onderliggende neurale architectuur gedoemd te mislukken. Tegelijkertijd leidt kennis over bouw en werking van de hersenen tot aanpassing en verfijning bij het specificeren van de cognitieve architectuur. Een voor de psycholoog relevante vraag is welke lering uit onze kennis van het brein te trekken valt voor onze theorieën en modellen aangaande menselijke cognitie. Laat ik een drietal relevante principes van neurale organisatie noemen.

(i) *Mussief parallelisme*. Alle gebieden van de cortex zenden output naar meer dan één gebied. Parallelisme is een kenmerk van alle corticale verbindingen.

(ii) *Godistribueerde localisatie van functies*. In tegenstelling tot wat de negentiende-eeuwse localisationisten dachten, is geen enkele cognitieve functie gekoppeld aan één specifiek gebied in de cortex. In alle gevallen gaat het om een netwerk van gebieden waarin de knopen een specialisatie voor een bepaald aspect van de betreffende functie belichamen. Deze specialisatie is eerder relatief dan absoluut. De neurale activiteit van het gehele netwerk, georkestreerd op basis van 're-entry' en synchroniciteit in het vuurpatroon van de neuronen, is het niveau waarop componenten van de cognitieve architectuur neuraal gerealiseerd worden.

(iii) *Relatieve functionele specialisatie*. Zoals we eerder gezien hebben spelen bepaalde gebieden in de cortex een cruciale rol voor een bepaalde functie zoals de waarneming van kleur, en geen rol bij andere functies. Er is dus sprake van functionele specialisatie in het brein. Deze is echter niet absoluut. V4 bijvoorbeeld is gespecialiseerd voor kleurwaarneming, maar daarnaast ook betrokken bij visueel-spatieel aandacht en vormcodering. Het gebied van Broca speelt een rol bij syntax, maar ook bij fonologische processen. Individuele corticale gebieden kunnen dynamisch worden ingeschakeld in meerdere functionele netwerken. Dit is wat Mesulam (1998) het

principe van selectief gedistribueerde verwerking heeft genoemd: vele corticale gebieden fungeren als knoop in meer dan één functioneel netwerk. Top-downverbindingen vanuit transmodale gebieden in de cortex zouden een rol kunnen spelen bij het selecteren van een bepaalde corticale knoop ten dienste van het ene of het andere netwerk.

Het zijn dit soort organisatieprincipes van neurale activiteit die van belang zijn voor en beperkingen opleggen aan specificaties van de cognitieve architectuur en aan computationele modellen voor taal, geheugen, waarneming, et cetera. Strikt seriële verwerkingsmodellen in de psychologie staan op gespannen voet met het massale parallelisme waarvan in het brein sprake is. Bepaalde klassen van connectionistische modellen doen onvoldoende recht aan de functionele specialisatie in de cortex.

Het incorporeren van neurobiologische kennis in theorieën over waarneming, taal, geheugen, emotie zal naar mijn overtuiging een belangrijke bijdrage leveren aan een dieper inzicht in menselijke cognitie. Het gaat hierbij echter niet om een eenrichtingsverkeer. In de neurobiologie ontbreekt het veelal aan voldoende uitgewerkte ideeën over de complexe representatieve structuren die in het spatiotemporele vuurpatroon van groepen corticale neuronen liggen besloten. Om die reden heeft de neurobiologie specificaties van de cognitieve architectuur nodig om op vruchtbare wijze het onderzoek naar de daarmee samenhangende neurale architectuur te kunnen verrichten.

Wij zijn thans aangeland in een fase waarin hersenonderzoekers en onderzoekers naar cognitie voldoende vooruitgang hebben geboekt om elkaars kennis zinvol in het eigen onderzoek in te vlechten. Op den duur zal dit leiden tot een steeds grotere verwevenheid van de betrokken vakgebieden en een steeds verdergaande co-evolutie of zelfs integratie van theorieën op het gebied van hersenen en cognitie.

Ten slotte kan men zich afvragen of mijn inschatting dat wij afstevenen op een toekomstige eeuw der cognitieve neurowetenschap niet illusoir is in het licht van gevestigde academische belangen en tradities, en het daarmee gepaard gaande verzet tegen verandering. Ten aanzien van deze kwestie ben ik allerminst pessimistisch. Niettegenstaande de vele psychologische, sociologische en contingent-historische (tezamen externe) factoren die het wetenschapsbedrijf beïnvloeden, wordt in de wetenschap de koers uiteindelijk toch in sterke mate bepaald door de interne kennisdynamiek. Zoals in het verleden nieuwe wetenschapsgebieden ontstonden uit het samengaan van andere wetenschapsgebieden – een bekend voorbeeld is het samengaan van de Mendeliaanse klassieke genetica en de Darwiniaanse evolutietheorie in de moderne synthese – zo zien we thans eenzelfde beweging richting cognitieve neurowetenschap. Het is als met de drijvende eilanden in het meer van Titicaca. De interne kennisdynamiek fungeert als de onderstroom die de eilanden van psychologie, neurobiologie, biofysica en informatica naar elkaar toe drijft, grensoverschrijdingen mogelijk maakt en de federatie van de cognitieve neurowetenschap vorm geeft.

Het decennium van het brein is in de Verenigde Staten net

afgelopen. In Duitsland is het decennium van het *menselijk* brein een paar jaar geleden begonnen. Wetenschappelijk en maatschappelijk leeft de verwachting dat doorbraken in onze kennis over hersenen en geest aanstaande zijn. Of en wanneer deze verwachting zal worden ingelost, is uiteindelijk niet voorspelbaar. Wat beleidsmakers en politici maar al te vaak vergeten is dat beleid gebaseerd is op de kennis van vandaag, maar dat het in de wetenschap gaat om de kennis van morgen. Daarvoor geldt, zoals Popper (1957) heeft opgemerkt, dat we vandaag niet kunnen voorzien wat we pas morgen zullen weten.

Ook al zijn garanties aangaande onze kennis van morgen niet te geven, toch trekt de cognitieve neurowetenschap dankzij nieuwe mogelijkheden het menselijk brein in werking te onderzoeken steeds meer onderzoekers en talentvolle studenten aan. Om die reden is er dan ook alle aanleiding om bij de 'weddenschap van het weten' hierop in te zetten, en de grenzen van onze kennis van hersenen en cognitie verder te verleggen.

De Gagarin van onze tijd

Tot nu toe heeft u tijdens het lezen van deze tekst moeiteloos enkele duizenden woorden herkend op basis van de visuele informatie die via de pagina's uw netvlies bereikte. Uw hersenen zijn daarbij voortdurend actief geweest. Een heel netwerk van gebieden in uw brein heeft de lijntjes en rondingen op de pagina's waargenomen, de woordbeelden herkend, deze informatie doorgeschakeld naar de hersengebieden waar de betekenis van woorden wordt gereconstrueerd, en die woordbetekenissen gecombineerd met kennis die in het langetermijngeheugen bewaard wordt. Dit alles voltrekt zich grotendeels buiten ons bewustzijn om en in fracties van seconden.

Het hele complex van al deze mentale processen wordt mogelijk gemaakt door een microkosmos van meer dan honderd miljard zenuwcellen met een veelvoud daarvan aan verbindingen. Deze microkosmos, veilig opgeslagen achter het benign omhulsel van ons schedeldak, is niet groter dan een halve voetbal. Weinig is fascinerender dan de ontdekkingsreizen door deze microkosmos, op zoek naar de fundamenteën van wat ons in staat stelt te zijn wie we zijn: het vermogen om te herinneren, onze gedachten in woorden uit te drukken, emoties te voelen, handelend in de wereld te staan. De cognitieve neurowetenschapper is de Gagarin van de 21ste eeuw, de ruimtereiziger in de microkosmos van ons brein. Door de ontwikkelingen in de cognitieve neurowetenschap is de psychologie niet meer denkbaar zonder de neurobiologie. De recente opkomst van de cognitieve neuropsychiatrie maakt duidelijk dat ook onderzoek naar en op termijn behandeling van psychopathologie door deze ontwikkelingen zullen worden beïnvloed. Of daarbij over honderd jaar het bordje psycholoog nog ergens op de voordeur hangt, is volstrekt oninteressant. Het gaat om de vragen en de manieren om die te beantwoorden. Al het andere is bijzaak. 'What is in a name?'

Prof.dr. P. Hagoort is directeur van het F.C. Donders Centre for Cognitive Neuroimaging van het Max Planck Instituut voor Psycholinguïstiek, Postbus 9101, 6500 MB Nijmegen.

Noten

1. Voor een uitvoeriger bespreking van de fMRI-methode, zie Hagoort & Brown (1993). Voor een bespreking van deze methode, alsmede voor een uitvoeriger bespreking van PET en fMRI, zie Hagoort & Ramsey 2002.
2. Voor andere voorbeelden van co-evolutie van wetenschapsgebieden zie met name hoofdstuk 9 in Churchland (1986).

Literatuur

- Brown, C.M., Hagoort, P. & Keurs, M. ter (1999). Electrophysiological signatures of visual lexical processing: Open- and closed-class words. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11, 261-281.
- Churchland, P.S. (1986). *Neurophilosophy. Toward a unified science of the mind-brain*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Hagoort, P. & Brown, C.M. (1993). Hersenpotentialen als maat voor het menselijk taalvermogen. *Stem-, Spraak- en Taalpathologie*, 2, 213-235.
- Hagoort, P. & Ramsey, N.F. (2002). De gereedschapskist van de cognitieve neurowetenschap. In F. Wijnen en F. Verstraten (red.), *Het brein te kijk* (p. 39-67). Lisse: Swets & Zeitlinger.
- Hagoort, P. & Turenhout, M. van (1997). The electrophysiology of speaking: possibilities of event-related potential research on speech production. In W. Hulstijn, H.F.M. Peters & P.H.H.M. Van Lieshout (Eds.), *Speech production. Motor control, brain research and fluency disorders* (p. 351-361). Amsterdam: Elsevier Science.
- Indefrey, P., Brown, C.M., Hellwig, F., Amunts, K., Herzog, H., Seitz, R.J. & Hagoort, P. (2001). A neural correlate of syntactic encoding during speech production. *PNAS*, 98, 5933-5936.
- Keurs, M. ter, Brown, C.M., Hagoort, P. & Stegeman, D.F. (1999). Electrophysiological manifestations of open- and closed-class words in patients with Broca's aphasia with agrammatic comprehension. An event-related brain potential study. *Brain*, 122, 839-854.
- Levelt, W.J.M., Roelofs, A. & Meyer, A.S. (1999). A theory of lexical access in speech production. *Behavioral and Brain Science*, 22, 1-38.
- Levelt, W.J.M. (1999). Producing spoken language: A blueprint of the speaker. In C.M. Brown & P. Hagoort (Eds.), *The neurocognition of language* (p. 83-122). Oxford: Oxford University Press.
- Mesulam, M.M. (1990). Large-scale neurocognitive networks and distributed processing for attention, language and memory. *Annals of Neurology*, 28, 597-613.
- Mesulam, M.M. (1998). From sensation to cognition. *Brain*, 121, 1013-1052.
- Popper, K.R. (1957). *The poverty of historicism*. London: Routledge & Kegan Paul.
- Turenhout, M. van, Hagoort, P. & Brown, C.M. (1997). Electrophysiological evidence on the time course of semantic and phonological processes in speech production. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 23, 787-806.
- Turenhout, M. van, Hagoort, P. & Brown, C.M. (1998). Brain activity during speaking: from syntax to phonology in 40 milliseconds. *Science*, 280, 257-274.
- Zeki, S. (1991). Cerebral akinetopsia (visual motion blindness). A review. *Brain*, 114, 811-824.
- Zihl, J., Cramon, D. von & Mai, N. (1983). Selective disturbance of movement vision after bilateral brain damage. *Brain*, 106, 313-340.

Summary

The royal engagement of psychology with neuroscience

P. Hagoort

Due to technological advances and scientific developments in the neurosciences, for the first time in history it is possible to investigate the healthy brain in action during cognitive operations. This has resulted in a new area of research: cognitive neuroscience. In this field psychology and neuroscience are integrated. After some examples of cognitive neuroscience in action, I will argue that the contribution of neuroscience will change the landscape of psychology substantially. Whether or not in 100 years time psychology still exists as an independent discipline is unclear and irrelevant. The problems and the ways of solving them are crucial, not the name tag of those that work on answering the scientific problems.